

令和3年5月7日

報道機関 各位

国立大学法人 電気通信大学

高速大容量を実現する新たな通信技術（Beyond 5G/6G の実現に向けて） —セルフリーMIMOのためのビームフォーマー設計法の開発—

産業機器やIoT向け高速大容量通信の設計法を開発

電通大石橋教授らが開発

セルフリーMIMOシステムで、周波数利用効率を7倍に

ポイント

- ・ Beyond 5G（第5世代移動通信システム高度化）・6G（第6世代移動通信システム）実現のための、高速・大容量な通信を可能する新たなビームフォーミング¹設計技術です。
- ・ ソサイエティ5.0では現実空間と仮想空間を融合した、より多様なサービス、アプリケーションの実現が期待されており、これを支える基盤技術として期待されます。
- ・ 基地局の機能を物理的に分割することで、従来のセルに基づいた基地局設計よりも高い周波数利用効率を達成するセルフリーMIMOシステムに着目し、各ユーザ端末が異なる数のアンテナを用いて通信を行う場合の新たなビームフォーミング設計法を確立し、従来手法と比較して最大で約7倍の周波数利用効率²を実現しました。
- ・ ビームフォーミングの設計に際し、システム要求に応じてシステム全体の周波数利用効率増大と、通信速度の利用者間公平性向上を任意に切り替えることを可能としました。

（概要と開発の背景）

電気通信大学先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター石橋功至教授、アブレウ・ジュゼッペ客員教授、飯盛寛貴協力研究員、安藤研吾氏（大学院情報理工学研究科情報・ネットワーク工学専攻修士課程2年）は、5G高度化・次世代の6Gに向けた高速大容量、多数同時接続を実現するビームフォーミング設計法を確立、周波数利用効率を従来の最大7倍

¹ ビームフォーミング：複数のアンテナ素子を用いて、特定の方向に電波を集中して放射する技術

² 最大比合成ビームフォーミングとの平均周波数利用効率に関する比較

に増大する新たな通信技術について、特許出願を行いました。

2020年から日本でも5Gのサービスが開始され、今後はスマートフォンのような多機能端末における超高速なファイル転送や3D、VR映像の視聴といった高速大容量通信だけでなく、産業機器やビッグデータを収集するIoTサービス向けの通信需要が急増することが見込まれています。しかしながら現行の5Gシステムでは、このようなデータ需要や提供サービスの爆発的な増加に対応できなくなることが予想されています。このためBeyond5G、6Gでは、次なるソサエティ5.0の実現を見据え、有限な無線通信資源を極限まで活用し、より多様な通信需要に対応可能な技術の確立が急務となります。

5Gで採用された大規模MIMO (Massive MIMO :Multiple-Input and Multiple-Output) システムでは、ビームフォーミングという、複数のアンテナ素子からの信号の振幅や位相を制御して特定の送受信角度に向けて電力を集中させる技術を用いて、通信効率を向上させています。しかしながら、実際に達成可能な通信容量は、通信基地局と各通信端末の位置関係などの通信環境に依存するため、無線資源を十分に活用しきれずに所望される通信効率の達成が困難となる場合があります。そこで、劣悪な通信環境においても高い通信品質を担保するため、一機の基地局に全アンテナを具備させる大規模MIMOシステムに対し、基地局の機能を、信号を放射するアクセスポイント (AP) と、信号処理を行う中央制御局 (CPU) に分割し、これを光フロントホールで接続することで、信号の送受信点を空間中に分散して配置するセルフリーMIMO (Cell-Free MIMO) システムが注目を集めています (図1)。

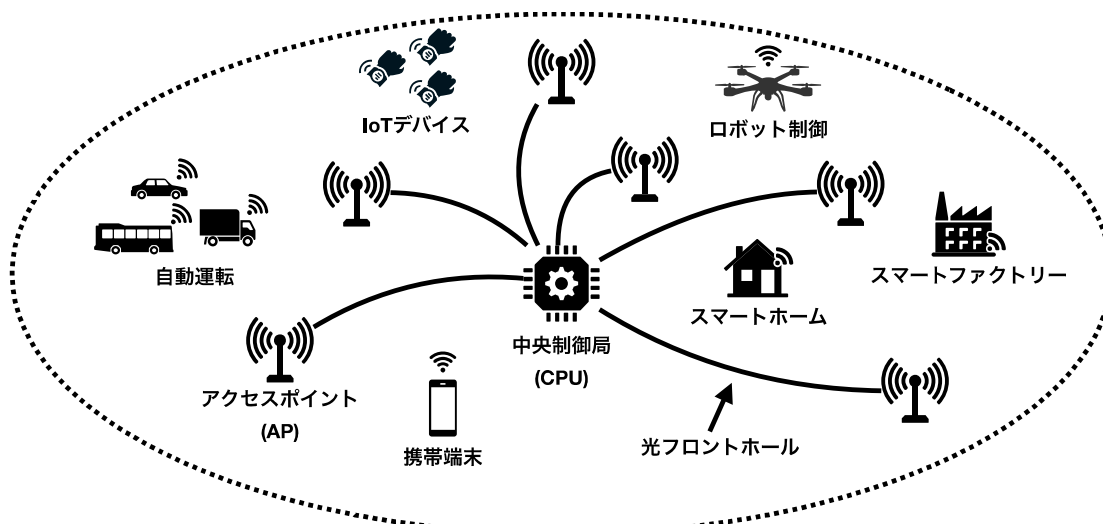


図 1 セルフリーMIMO システムの概念図

セルフリーMIMOシステムでは、分散配置された各APをCPUによって制御することで統合的なビームフォーミングを実現し、干渉を抑圧しながら、複数の端末と同時に通信します。このためセルフリーMIMOシステムでは、周波数を分割する必要がなく、無線資源を極限まで活用可能となりますが、将来予期される多様な通信状況に対する検討は十分ではありません。

せん。Beyond 5G、6G では自動運転車やロボット、ドローンなど、様々なサイズのデバイスと高速・大容量な通信を実現する必要がありますが、デバイスサイズの制約によって、各ユーザ端末 (UE) のアンテナ数が異なるような場合、従来のビームフォーミング設計では、通信の干渉構造の複雑性により干渉の抑圧が不十分となってしまう、極限的な周波数活用を達成できなくなってしまいます。このため、低計算量でこの複雑な干渉構造に対しても高い性能を実現する新たなビームフォーミング設計が必要とされています。

今回の私たちの発明では、ML-GSVD (Multi-Linear Generalized Singular Value Decomposition : 多線形一般化特異値分解) と呼ばれるテンソル演算を改善した OEML-GSVD (Orthogonality-Enforcing ML-GSVD) を提案し、これを用いることで UE ごとに具備するアンテナ数が異なるようなセルフリーMIMO システムにおいても、通信の干渉構造に基づいた適切なビームフォーミングの設計を低計算量で可能としました。さらに、ビームフォーミングの基本設計を変えることなく、通信要求に応じたシステム全体の周波数利用効率増大と、通信速度の利用者間公平性向上の切り替えを可能としました。

(開発の内容)

今回開発したビームフォーミング技術は、アンテナを具備するアクセスポイント (AP) を空間中に分散して多数配置するセルフリーMIMO システムに対するものです。特に、今回の開発ではシステムは図 1 に示したように中央制御局 (CPU)、複数のアクセスポイント (AP)、通信トラフィックに対して十分に高速通信が可能なフロントホール接続、そして複数の端末 (UE) で構成されるセルフリーMIMO システムを想定しています。ここで端末としてはスマートフォンなどの携帯移動端末、自動車などに搭載された車載端末、ロボットやドローンなどの移動体に搭載された無線通信端末などが想定され、そのアプリケーションやデバイスサイズに対応した本数のアンテナが具備されているものとしています。

このようなセルフリーMIMO システムでは、CPU による中央制御のもと全ての AP を用いて同時に全ての UE に対する通信が行われます。この際、全 AP、各 UE から送信された信号はそれぞれ異なる伝搬路を介して各 UE、全 AP に受信されます。この伝搬路のそれぞれの状態は UE 数と同数のそれぞれサイズが異なる通信路行列として表現可能となります。このような複数のサイズの異なる通信路行列は、テンソル演算である ML-GSVD を用いることで図 2 に示すような、共通成分と固有成分に分解することが可能となります。

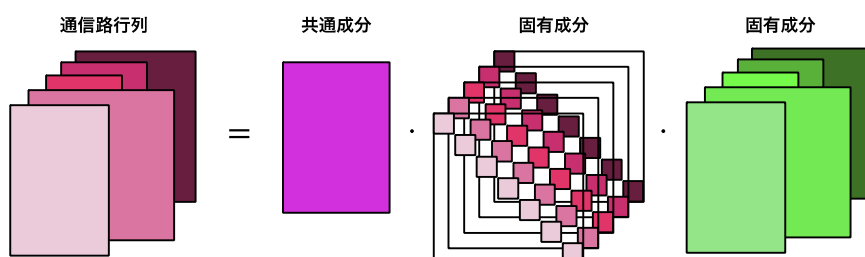


図 2 ML-GSVD の分解イメージ図

本発明では、この ML-GSVD を用いることで通信路構造にもとづき、各 UE に対して直交した次元での通信を行うビームフォーマー設計を実現しました。また、各 UE への割当次元を互いに排他的にすることでユーザ間干渉を極限まで抑圧することを可能とし、この次元割当および、各次元に対する電力割当の規範を変更することにより、代表的なシステム要求である周波数利用効率の最大化、ユーザ間公平性の向上のそれぞれに対応可能となります。さらに本発明では、今回発明したビームフォーミング設計により適した特性をもつように ML-GSVD アルゴリズムを改良した OEML-GSVD アルゴリズムを提案し、これを提案ビームフォーミングと共に用いることで、従来ビームフォーミングに対して最大で約 7 倍の周波数利用効率を実現しました。

(研究開発の結果)

評価として、シミュレーションを用いた周波数利用効率の計算を行い、良好な特性が得られることを確認しました。

表 1 シミュレーション諸元

符号	パラメータ名	数値
L	アクセスポイント数	可変
N	アクセスポイントのアンテナ数	可変
k	端末数	可変
M_k	k番目の端末のアンテナ数	可変
Q_k	k番目の端末のデータストリーム数	可変
h	アンテナ高度	10[m]
f_c	キャリア周波数	2[GHz]
B	バンド幅	10[MHz]
σ^2	各端末の雑音分散	-96[dBm]
P	総送信電力制約	45[dBm]
P_k^u	k番目の端末の送信電力制約	30[dBm]
D	通信システム領域の長さ(正方形の一辺)	300[m]

表 1 にシミュレーションに用いたパラメータを示します。

図 3 は ML-GSVD のための繰り返しアルゴリズムの収束特性についてのシミュレーション結果の一例を、従来型の ML-GSVD と今回の改良型の OEML-GSVD との比較で示しています。

横軸に分解のために必要な繰り返し回数 (Iteration)、縦軸に正規化した分解誤差 (Normalized Error) を示します。

繰り返し回数 i がある閾値を超えると、改良型 ML-GSVD が従来型よりも下に位置しており、すなわち分解の誤差が少なくなる (精度が高くなる) ことを示しています。

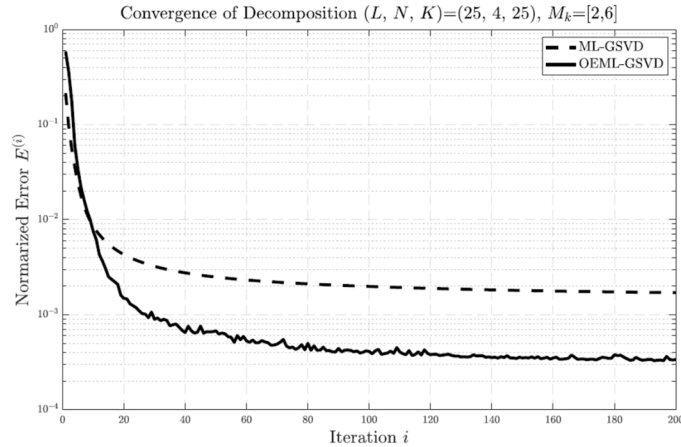


図 3 ML-GSVD、OEML-GSVD の分解特性

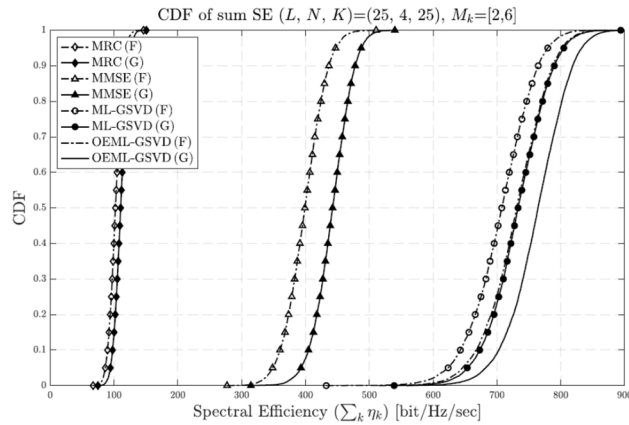


図 4 下りリンクにおける周波数利用効率の CDF

図 4 はダウンリンク通信方法において、中間的な負荷状態におけるすべての端末の周波数利用効率に関するシミュレーション結果の一例で、横軸は全 UE の周波数利用効率 (Spectral Efficiency)、縦軸は周波数利用効率の CDF (Cumulative Distribution Function: 累積分布関数) を示しています。

最大比合成 (MRC: Maximal Ratio Combining)、最小平均二乗誤差 (MMSE: Minimum Mean Square Error) に基づく従来のビームフォーミング技術と、今回発明したビームフォーミング技術に対して ML-GSVD と OEML-GSVD のそれぞれを用いた場合について想定し、各方式に対して、システム全体の周波数利用効率 (図中 G) または、ユーザ間の公平性を優先した場合 (図中 F) のそれぞれについてシミュレーションを行った結果を示しています。図より、周波数利用効率を優先した場合 (図中 G) でも、公平性を優先した場合 (図中 F) でも、今回の改良型 OEML-GSVD の結果が従来型の結果に対して、常に右側に位置しており、より優れた周波数利用効率を実現していることを示しています。

図 5 はアップリンクについて同様な比較を行ったものですが、同じように周波数効率を

優先した場合でも、公平性を優先した場合でも、今回の改良型 ML-GSVD の結果が従来型の結果よりも右に位置しており、周波数利用効率が優れていることを示しています。

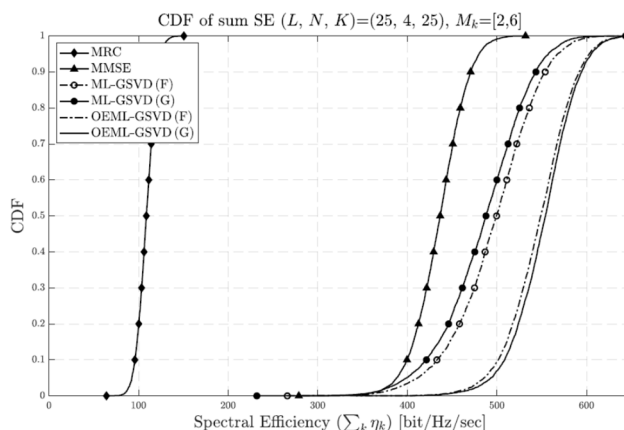


図 5 上りリンクにおける周波数利用効率の CDF

(研究開発の効果)

Beyond 5G、6G では端末としてスマートフォンだけでなく、自動運転車やロボット、ドローンなど、様々なサイズのデバイスと高速・大容量な通信を実現し、極限的な周波数利用効率を達成する必要があります。本発明によって、セルフリーMIMO システムにおいて、各 UE の具備するアンテナ数が異なる環境においても、周波数利用効率および利用者間の公平性を向上させることが可能となりました。また、従来では通信速度が遅くなりがちな駅や繁華街などの混雑するエリアでも快適な通信を行えるなどの効果が期待できます。

(特許)

出願番号 (出願日) : 特願 2021-025816 (2021 年 02 月 22 日)

(お問合わせ先)

研究内容に関すること

国立大学法人 電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター

教授 石橋功至

電話 : 042-443-5781

E-mail: koji@awcc.uec.ac.jp

報道に関すること

国立大学法人 電気通信大学 総務企画課広報係

電話 : 042-443-5019

E-mail: kouhou-k@office.uec.ac.jp